

рис. 4, по результатам которого можно заключить, что максимальную среднюю температуру насадки при характеристиках теплоносителя, соответствующих рис. 1, можно получить при времени нагрева $\tau_{\text{нагр}}$, равном 100 с. На этом же рисунке показан характер изменения к.п.д. периода охлаждения $\eta = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{н}}} \cdot 100 \%$. Величина этого показателя определяется при прочих равных условиях средними температурами материала, а также средней температурой воздуха и временем охлаждения $\tau_{\text{охл}}$ насадки, которое в существенной мере зависит от положения экстремума температур насадки по ее высоте. Значения средних температур для времени нагрева 80 и 120 с равны примерно 1530 °С, время охлаждения соответственно равно 79 и 72 с, средние температуры воздуха составляют 1305 и 1390 °С, экстремумы температур материала расположены на расстоянии соответственно 0,34H и 0,72H от входа теплоносителя в насадку. Таким образом, можно заключить, что при одинаковых средних температурах насадок в конце периода нагрева смещение максимума температур к началу насадки приводит к увеличению времени охлаждения (на 9 %) и снижению средней температуры воздуха на 6 %, что привело к увеличению значения η с 0,66 до 0,845 соответственно.

Выводы. Время нагрева насадки при переменных характеристиках теплоносителя не является единственным параметром, определяющим эффективность ее работы. Характер изменения температуры и расхода газа на входе в слой в этом случае оказывает существенное влияние на к.п.д. и температуру нагрева дутья, приводит к деформации и появлению экстремумов в распределении температур по длине насадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доменные воздухонагреватели. М., «Металлургия», 1982. 176 с. с ил. Авт.: Ф. Р. Шкляр, В. М. Малкин, С. П. Каштанова и др. 2. Абзалов Ю. М., Невский А. С. — «Изв. вуз. Черная металлургия», 1971, № 2, с. 142—145. 3. Михеев М. А. Основы теплопередачи, Новосибирск — Л., Госэнергоиздат, 1956. 392 с. с ил. 4. Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. А. Теплотехника доменного процесса. М., «Металлургия», 1966. 355 с. с ил. 5. Тимофеев В. Н. — «Изв. ВТИ», 1949, № 2, с. 48—55.

Уральский политехнический институт. Поступила 11 ноября 1984 г.

УДК 669.046:536.241

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА В РОЛИКО-ФОРСУНОЧНЫХ СЕКЦИЯХ СЛЯБОВЫХ МНЛЗ

Р. Г. Акмен, Б. И. Кубрик, А. Р. Переселков,
В. А. Белый, М. В. Сагайдак

Качество слитков, получаемых на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), во многом определяется рациональной организацией теплоотвода в зоне вторичного охлаждения. На практике режимы охлаждения в ней подбирают путем изменения расходов охладителя по длине этой зоны на основании анализа качества литого металла. Такого рода исследования носят характер вариантного поиска и требуют проведения целой серии весьма трудоемких экспериментов. Поэтому для подобных задач наиболее целесообразно применение методов математического моделирования.

В то же время использование этих методов требует экспериментального определения граничных условий теплообмена, ибо множество факто-

ров технологического и конструктивного характера, влияющих на теплообмен в этой зоне, не может быть учтено расчетным путем. Поэтому Харьковским политехническим институтом (ХПИ) совместно с институтом ВНИПИчерметэнергоочистка проведены исследования с целью определения коэффициентов теплообмена при охлаждении слитка в зоне вторичного охлаждения. Исследования проводили применительно к условиям охлаждения в роliko-форсуночных секциях слабовых МНЛЗ криволинейного типа.

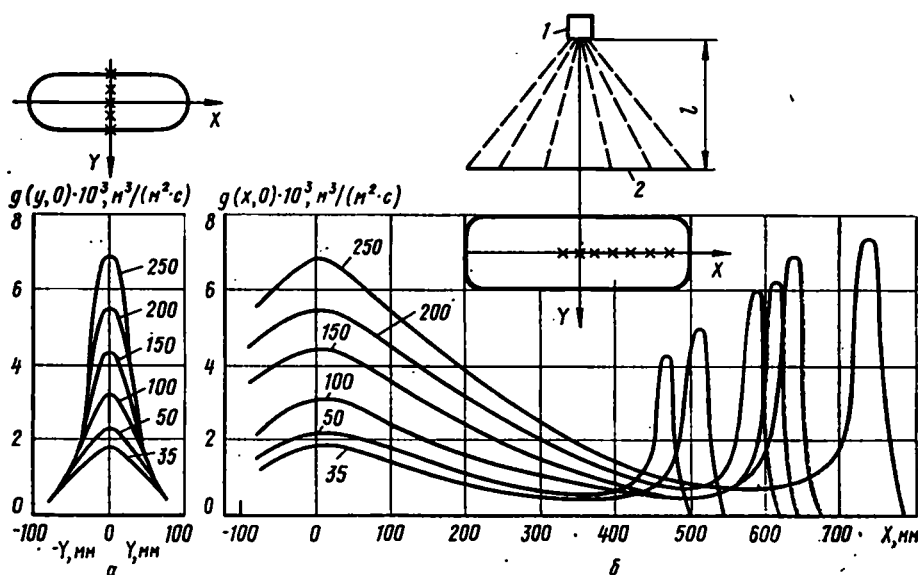


Рис. 1. Изменение плотности орошения вдоль оси y (а) и вдоль оси x (б) для плоскофакельной форсунки при различных давлениях (цифры у кривых, кПа): 1 — форсунка; 2 — плоскость орошения; l — расстояние между форсункой и плоскостью орошения

Для определения локальных коэффициентов теплообмена на участках поверхности слитка, орошаемых водой, на экспериментальных стендах ХПИ проведены исследования процесса охлаждения высокотемпературной поверхности водой, диспергированной форсунками. Давления перед форсунками соответствовали измеренным на «холодной» машине по различным зонам в зависимости от скорости разливки. Исследование проводили для партий однотипных форсунок, состоящих из 10—15 штук. Рассмотрены форсунки №№ 129, 11 и 141 (маркировка завода Уралмаш), которые применяются в настоящее время для распыла воды в зоне вторичного охлаждения на слабовых МНЛЗ.

На рис. 1 приведены данные, характеризующие изменение плотности орошения вдоль оси y , $g(0, y)$ и вдоль оси x , $g(0, x)$, при работе плоскофакельной форсунки № 141 в диапазоне давлений 35—250 кПа. Как видно, в зоне орошения вдоль оси x имеет место существенная неравномерность распределения воды. При этом явно выражены участки наиболее интенсивного орошения в центре и на периферии факела, где $g=2\div 7$ мм³/(мм²·с) в зависимости от давления. Размеры факела по оси x для этой форсунки в зависимости от давления лежат в пределах 900—1500 мм, а по оси y практически не меняются и составляют 160—200 мм. Такой же характер распределения плотности орошения получен и при работе форсунки № 11. В то же время из-за того, что в зонах, где установлены форсунки № 11, расстояния от поверхности слитка до форсунки (b) в 1,5 раза меньше, значения g при тех же давлениях в 1,6—2 раза выше, чем полученные для форсунки № 141. Размеры факелов при этом уменьшаются и для давлений 50—250 кПа составляют 700—1000 мм по оси x и 100—120 мм по оси y .

По локальным значениям плотности орошения определены соответствующие им плотности теплового потока с поверхности слитка. Для этого использовалась экспериментальная зависимость [1]: $q = 4,6 \cdot 10^4 P^{0,1} g^{0,4}$; $\alpha = 5,6 \cdot 10^3 P^{0,1} g^{0,4}$, где q — удельный тепловой поток; α — коэффициент теплоотдачи; P — давление перед форсункой.

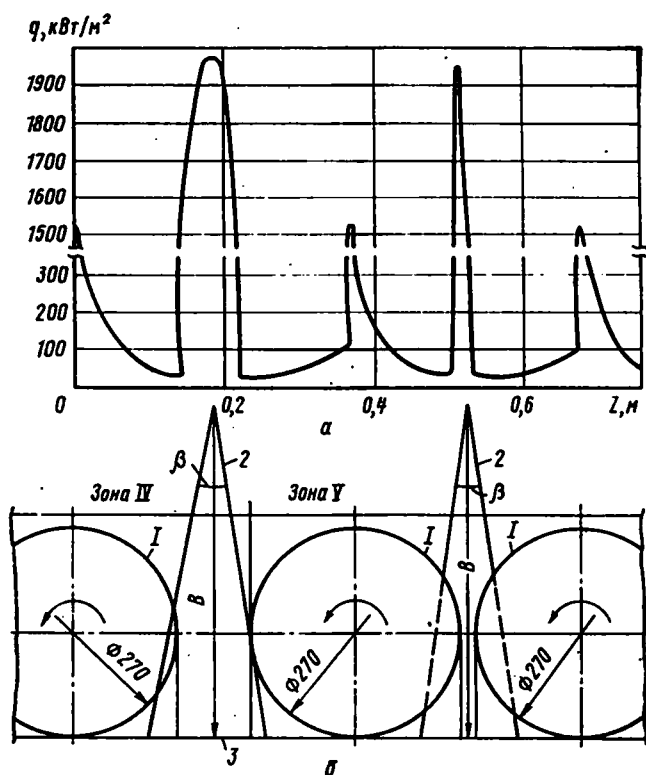


Рис. 2. Изменение плотности теплового потока (а) и расчетная схема по определению граничных условий теплообмена (б) на одном из участков роliko-форсуночных секций:
1 — ролик; 2 — зона действия факела диспергируемой жидкости; 3 — поверхность слитка; 4 — угол раскрытия факела

Как показано выше, с изменением давления существенно изменяется плотность орошения и размеры факела (рис. 1). Однако в соответствии со второй зависимостью $\alpha \approx g^{0,4}$, т.е. изменение коэффициента теплоотдачи будет менее значительно, чем изменения плотности орошения. Так, например, применительно к форсунке № 141 с уменьшением давления от 250 до 35 кПа, т.е. более чем в 7 раз, плотность орошения в центре факела $g(0,0)$ изменяется от 6,8 до 1,8 $\text{мм}^3/(\text{мм}^2 \cdot \text{с})$, т.е. в 3,8 раза, а интенсивность теплообмена изменяется от 2550 до 1580 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, т.е. только в 1,6 раза. Таким образом, из данных настоящего исследования следует, что при охлаждении слитка водой регулировать интенсивность охлаждения в широком диапазоне не представляется возможным.

Для определения граничных условий теплообмена на участках поверхности слитка, экранированных роликами, проведено численное исследование теплового состояния роликов с учетом внешних условий теплообмена¹. При этом ограничились оценкой плотности теплового потока, снимаемого водоохлаждаемым роликом со слитка в предположении, что температура поверхности слитка постоянна. В результате решения получено тем-

¹ К у б р и к Б. И. Математическая модель теплопереноса при формировании непрерывного слитка. Автореф. канд. дис. Харьков, 1983.

пературное поле и распределение теплового потока на поверхности водоохлаждаемого ролика диам. 270, 300, 320 и 430 мм в режиме нагрева и выхода на стационарный режим. Анализ полученных данных показал, что выход роликов на стационарное тепловое состояние происходит за 25—30 оборотов или за 0,5—0,7 ч в зависимости от скорости вытягивания слитка. Установлено, что плотность теплового потока, поступающего в ролик со слитка, колеблется от $(1,1—1,6) \cdot 10^6$ Вт/м² в зоне контакта до $(2,5—3) \times 10^5$ Вт/м² в зоне лучистого теплообмена ролика со слитком. В зоне действия распыленной из форсунки воды плотность теплового потока, снимаемого с поверхности ролика, достигает $(1—1,3) \cdot 10^5$ Вт/м², тогда как на остальной открытой поверхности составляет не более $2,5 \cdot 10^4$ Вт/м².

На основе данных о локальном распределении плотности тепловых потоков в зоне орошения и по удельным тепловым потокам, воспринимаемым роликами от слитка, определены средние по секциям удельные тепловые потоки \bar{q} и коэффициенты теплоотдачи $\bar{\alpha}$ с учетом конкретного расположения форсунок и элементов роликовой проводки.

На рис. 2 в качестве примера приведена расчетная схема по определению величин \bar{q} и $\bar{\alpha}$ по малому радиусу в центре широкой грани слитка для пятой зоны (применительно к МНЛЗ завода «Азовсталь»). Для отдельных участков слитка в зонах, где принудительное водяное охлаждение отсутствует, по данным работы [2], исходя из возможного уровня температуры поверхности слитка в этой зоне (900—1000 °С) [3], проведена оценка суммарного коэффициента теплоотдачи за счет лучеиспускания и свободной конвекции. Установлено, что суммарный коэффициент теплоотдачи на этих участках в диапазоне скоростей разлива $v=0,6 \div 0,8$ м/мин может составлять 120—130 Вт/(м²·К).

Расчетные данные, характеризующие величину $\bar{\alpha}$ по секциям зоны вторичного охлаждения в центре широкой грани слитка, представлены ниже:

v, м/мин	Значения $\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·К), по зонам								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XI
0,6	873	348	270	315	318	232	318	120	120
0,8	940	425	312	371	378	252	260	130	130

Анализ приведенных выше данных позволяет заключить, что при существующих режимах и способах охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения имеет место существенная неравномерность теплообмена, как в пределах каждой секции, так и по всей длине этой зоны, что не может не сказываться на характере температурного поля слитка.

Выводы. Распыл воды форсунками существующей конструкции приводит к значительной неравномерности орошения слитка по ширине с локальными минимумами плотности орошения в центре факела и по его краям. При орошении слитка водой регулировать интенсивность охлаждения в широком диапазоне не представляется возможным, поскольку локальная интенсивность теплообмена мало меняется с изменением расхода воды и остается достаточно высокой даже при малых (35 кПа) давлениях перед форсунками. При существующих режимах и способах охлаждения слитка в ролико-форсуночных секциях криволинейных МНЛЗ имеет место существенная неравномерность теплоотвода как в пределах каждой секции, так и по всей длине зоны вторичного охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Переселков А. Р., Братута Э. Г. — В кн.: Энергетическое машиностроение. Харьков, «Вища школа», 1982, с. 77—81.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М., «Энергия», 1975. 488 с. с ил.
3. Акмен Р. Г., Кубрик Б. И., Николаев Г. А. — «Сталь», 1981, № 12, с. 35—37.

Харьковский политехнический институт. Поступила 29 апреля 1985 г.